

Transductor de deformación y temperatura basado en redes de difracción y fibras estrechadas: diseño e implementación

Strain and temperature transducer based in FBG and tapers: design and implementation

Antonio QUINTELA⁽¹⁾, M^a Inmaculada BARQUIN⁽¹⁾, Marian QUINTELA⁽¹⁾, Angel ULLÁN⁽¹⁾,
Jose Miguel LOPEZ-HIGUERA⁽¹⁾

1. Grupo de Ingeniería Fotónica, Edificio de I+D+i de Ingeniería de Telecomunicación,
Universidad de Cantabria, Avda. de los Castros, s/n

Persona de contacto: Antonio Quintela (quintela@unican.es).

RESUMEN:

Se presenta el diseño, optimización, implementación y comprobación práctica de un transductor de deformación y temperatura basado en redes de difracción en fibra óptica y fibras estrechadas. Usando una única máscara de fase se graban dos redes de difracción con el mismo periodo, cada una en una zona de la fibra estrechada con diferente diámetro, pero constante. Tanto la longitud del transductor como el diámetro mínimo de la zona estrechada de la fibra determinan el comportamiento y prestaciones del transductor. En el artículo se estudia teóricamente como es esa influencia, para posteriormente corroborar de manera práctica las conclusiones obtenidas.

Palabras clave: Red de difracción en fibra óptica, transductor fibra óptica, fibra estrechada, discriminación, optimización

ABSTRACT:

A temperature and strain optical fiber transducer and its optimal design are presented. The hybrid structure is composed of two Fiber Bragg Gratings (FBG) in a fused taper. Using the same phase mask one of the FBG is written outside of the taper, and the other one in the middle of the taper, in the area with constant diameter. The taper diameter and the structure length play a key role on the transducer behavior. Useful results to optimize the transducer structure design, from a theoretical and experimental investigation, are reported in this paper.

Key words: FBG, optic transducer, fibre taper, strain temperature discrimination, optimization

1.- Introducción

Las redes de difracción en fibra óptica pueden ser considerados como uno de los elementos más usados en el campo de los sensores en fibra óptica en los últimos años [1]. La combinación de redes de difracción y fibras estrechadas permite mejorar el comportamiento de las mismas, por ejemplo para poder discriminar entre deformación y temperatura [2, 3], para obtener redes de difracción

chirpeadas [3, 4] o para modificar la respuesta a la deformación de la red de difracción [5].

En este artículo se muestra el estudio teórico, diseño, optimización, implementación y caracterización de un transductor de deformación y temperatura combinando redes de difracción y fibras estrechadas.

2.- Teoría

El esquema del transductor propuesto es el mostrado en la Fig 1. Consiste en dos redes de difracción del mismo periodo grabadas en dos zonas de diferente diámetro de una fibra óptica estrechada. En el transductor se pueden distinguir tres zonas; la zona 1 que es la zona donde no se ha variado el diámetro original de la fibra óptica, 125 μm , la zona 2 que es una zona de diámetro no constante y la zona 3 que tiene un diámetro constante e inferior a las 125 μm . Una red de difracción está grabada en la zona 1 y la otra en la zona 3. Cada una de las secciones tiene un tamaño L_1 , L_2 y L_3 respectivamente, siendo el tamaño total del transductor L_{TOTAL} , que es la distancia entre los dos puntos de anclaje entre los que se aplica la fuerza, F , que deforma el transductor.

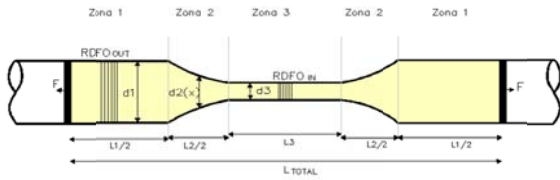


Fig.1: Esquema del transductor propuesto.

2.1.- Deformación

Cuando se aplica una fuerza constante entre dos puntos de un cilindro, este sufre una deformación o estiramiento constante entre esos dos puntos cuyo valor viene dado por:

$$\varepsilon = \frac{4F}{E\pi d^2} \quad (1)$$

donde F es la fuerza aplicada, d es el diámetro del cilindro y E es el módulo de Young del material.

Para el caso del transductor propuesto al aplicar la fuerza constante entre los dos puntos de anclaje en cada una de las tres zonas se tiene un valor diferente de deformación. La relación entre esos valores es constante y solo depende de la relación entre los diámetros de cada zona. Así por ejemplo para la zona 3 y la 1 viene dada por:

$$k_{3-1} = \frac{\varepsilon_3}{\varepsilon_1} = \frac{d_{\text{fiber}}^2}{d^2} \quad (2)$$

La deformación entre los dos puntos de anclaje del transductor también se puede rela-

cionar con la deformación en cada una de las zonas, obteniéndose que la deformación total es proporcional a las deformaciones en cada una de las zonas, dependiendo la constante de proporcionalidad principalmente del tamaño de cada una de las tres zonas. La relación entre la deformación total del transductor y la de la zona 1 se puede expresar como:

$$\varepsilon_T = \frac{\varepsilon_1(L_1 + k_{2-1}L_2 + k_{3-1}L_3)}{L_1 + L_2 + L_3} = \varepsilon_1 \cdot Q \quad (3)$$

donde Q es siempre mayor que la unidad y

$$\lim_{L_1 \rightarrow \infty} Q = 1 \quad (4)$$

2.2.- Índice Efectivo

El índice de refracción efectivo en una fibra óptica tiene una dependencia con el radio de la misma, de manera que cuanto menor es el radio de la misma menor es el índice de refracción efectivo[6].

Si se graban dos redes de difracción con el mismo periodo, usando una misma máscara de fase, en dos zonas de una fibra óptica con diferentes diámetros se tendrán dos valores diferentes de longitud de onda de Bragg, siendo menor para la red grabada en la zona de la fibra con menor diámetro.

2.2.- Comportamiento del transductor con la deformación y la temperatura

En el transductor propuesto en la Fig. 1, al tener dos redes de difracción grabadas en la zona 1 y en la 3, se tendrá un espectro de reflexión del transductor con dos picos. Cuando se aplique una fuerza constante entre los extremos del transductor la deformación sufrida por cada una de estas redes será diferente, siendo mayor en la zona 3 por tener menor diámetro (2). Al ser directamente proporcional el desplazamiento, en longitud de onda, de una red de difracción con la deformación a la que es sometida se tendrá que ese desplazamiento en la longitud de onda de Bragg, para una fuerza constante, será mayor en la red grabada en la zona 3.

A medida de que la fuerza aplicada aumenta ambos picos de reflexión se desplazan a longitudes de onda superiores, pero al desplazarse más el que tiene menor longitud de onda de Bragg hará que la distancia entre ambos picos vaya disminuyendo. Se llegará a

un punto en el que la fuerza aplicada ocasione que los dos picos de reflexión del transductor estén tan próximos entre sí que sea imposible por parte de una unidad de interrogación distinguirlos.

Sin embargo el comportamiento con la temperatura de ambas redes de difracción va a ser similar. La distancia entre los dos picos de reflexión se mantendrá constante para cualquier valor de temperatura, permitiendo hacer una discriminación entre deformación y temperatura.

La distancia entre ambos picos va a determinar la deformación del transductor, y con los valores absolutos de las longitudes de onda de ambos picos se podrá obtener la temperatura a la que está sometido el transductor.

3.- Variables de diseño

El comportamiento del transductor tiene una gran dependencia con el diámetro de la zona estrechada y con la longitud de cada una de las tres zonas. La elección de esos valores es clave para tener unas prestaciones u otras del transductor.

La sensibilidad del transductor se puede definir como la variación en la distancia entre los dos picos de reflexión cuando la deformación se incrementa en $1 \mu\epsilon$. El rango dinámico será el máximo valor de deformación que es posible medir. Para cada uno de estos parámetros se va a estudiar cómo se ven afectados por las variables de diseño del transductor (diámetro de la zona estrechada y longitud del transductor).

La sensibilidad del transductor se puede expresar como

$$\Delta(\lambda_{out} - \lambda_{in}) = k (k_{3-1} - 1) \quad (5)$$

donde λ_{out} es la longitud de onda de la red grabada en la zona 1, λ_{in} la de la grabada en la zona 3, k es la relación entre el desplazamiento en longitud de onda y la deformación en una red de difracción, típicamente $1,1 \text{ pm}/\mu\epsilon$ y k_{3-1} es la relación entre las deformaciones en la zona 3 y 1 del transductor.

Cuanto menor sea el diámetro de la zona estrecha mayor será el valor de k_{3-1} (2) y por lo tanto mayor la sensibilidad del transductor.

Si se aumenta la longitud del transductor, aumentando por ejemplo L_1 , va a disminuir el valor de Q (4) y por lo tanto para un mismo valor de deformación del transductor, ϵ_T , va a aumentar tanto el valor de ϵ_1 como el de ϵ_3 , aumentando el desplazamiento de ambos picos de reflexión y por lo tanto aumentando la sensibilidad.

Respecto al rango dinámico es más aconsejable para su estudio usar el rango dinámico de la red de difracción grabada en la zona 1, y no el del transductor, ya que ambos son proporcionales (3) pero en el primero de los casos no depende del tamaño del transductor y es entonces más sencillo conocer qué valor de diámetro de la fibra estrechada los maximiza. Si se fija en $0,4 \text{ nm}$ la distancia mínima entre los dos picos de reflexión para poder medir ambos sin problemas, el rango dinámico de la red de difracción de la zona 1 viene dado por:

$$RD_{RDFO1} = \frac{\lambda_{Bout} - \lambda_{Bin} - 0.4}{k \left(\frac{125^2}{d^2} - 1 \right)} \quad (6)$$

donde λ_{Bout} es la longitud de onda de la red grabada en la zona 1 cuando no existe deformación alguna en el transductor, λ_{Bin} la correspondiente a la red grabada en la zona 3.

Cuanto menor sea el diámetro de la zona estrechada más separados estarán los picos de reflexión de las redes de difracción, ya que mayor es la diferencia entre los índices efectivos de refracción en la zona 1 y 3 del transductor [6], pero mayor diferencia habrá entre la velocidad a la que se muevan ambos picos ante un aumento constante de la deformación, y por lo tanto menor deformación total es necesaria para conseguir que ambos picos se aproximen lo suficiente para no distinguir uno de otro. Por lo tanto debería existir un valor de diámetro de la zona estrechada que maximice el rango dinámico. Representando la ecuación (6) haciendo uso de la relación entre índice de refracción efectivo de una fibra y su diámetro mostrada en [6] se obtiene que el diámetro óptimo estaría en torno a $100 \mu\text{m}$, como queda reflejado en la Fig. 2.

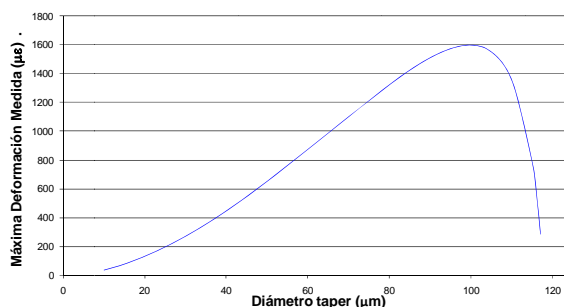


Fig.2: Variación del Rango Dinámico de la red de difracción en la zona 1 respecto al diámetro de la zona estrechada

Si se aumenta la longitud del transductor, aumentando L_1 , el rango dinámico total del transductor se va a ver afectado, ya que es proporcional al de la red de difracción de la zona uno y la constante de proporcionalidad Q va a disminuir. Por lo tanto a medida de que se aumente la longitud del transductor el rango dinámico de este va a disminuir.

En resumen cuanto menor sea el diámetro de la zona estrechada mayor será la sensibilidad pero sin embargo habrá un valor de diámetro que maximice el rango dinámico. Un aumento en la longitud del transductor, aumentando L_1 , aumenta la sensibilidad pero disminuye el rango dinámico.

4.- Resultados experimentales

Para poder corroborar de manera práctica lo mencionado en el apartado anterior se realizaron diferentes transductores con diferentes diámetros de la zona estrechada (60, 75, 90, y 100 μm). Estos transductores se caracterizaron tanto en temperatura, obteniendo que el desplazamiento de los picos de reflexión con la temperatura eran similares en todas las redes, independientemente del diámetro de la zona de la fibra donde estuviesen grabadas. También se caracterizaron en deformación manteniendo constante la longitud del transductor, 150 mm. Para uno de los diámetros (60 μm) se caracterizaron transductores con diferente longitud (78, 100, 143 y 168 mm).

A la hora de mostrar los resultados obtenidos se decidió representar la evolución de la distancia entre los picos de reflexión con respecto a la deformación aplicada, siendo muy sencillo extraer de esta gráfica tanto la sensibilidad como el rango dinámico.

En la Fig 3 se muestra cómo se puede extraer de esas gráficas el valor de sensibilidad y rango dinámico. La sensibilidad es directamente la pendiente de la misma y el rango dinámico será el valor de deformación que haga que la curva se cruce con la recta horizontal de valor igual a la distancia mínima entre los dos picos para que ambos sean detectables, 400 pm en este caso.

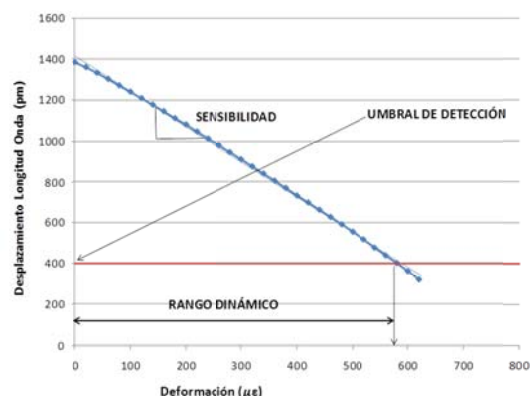


Fig.3: Obtención experimental de la sensibilidad y Rango dinámico.

En un primer lugar en la Fig 4 se muestran los resultados de caracterización de diferentes transductores de igual tamaño y diferente radio de la zona estrechada. Se puede observar como a medida de que aumenta el diámetro las curvas tienen menos pendiente, por lo que su sensibilidad es menor, como se obtuvo teóricamente. Por otro lado el rango dinámico va aumentando con el diámetro hasta llegar a un valor máximo, para un diámetro en torno a 90 μm , para luego decrecer rápidamente para un diámetro de 100 μm . Esto concuerda perfectamente con lo mostrado en la Fig 2, con la única diferencia que en el caso práctico ha salido que el diámetro que maximiza el rango dinámico está en torno a 90 μm en vez de las 100 μm que salía de manera teórica. Esto puede ser debido a que la dependencia del índice de refracción con el diámetro de la fibra usado en la simulación, tomado de [6] es diferente al comportamiento real de la fibra óptica usada en los experimentos.

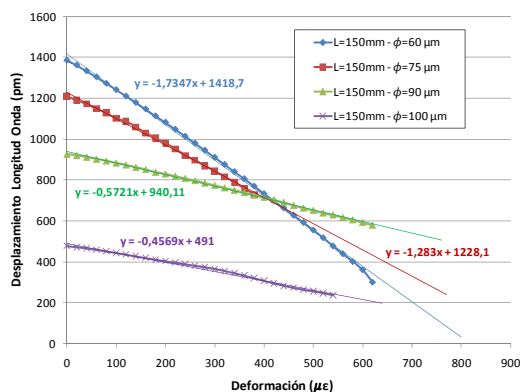


Fig.4: Medidas experimentales de diferentes transductores de diferentes diámetro e igual longitud.

Finalmente en la Fig 5 se muestran los resultados de la caracterización en deformación de 4 transductores de igual diámetro pero diferentes longitudes. Se puede observar como efectivamente para todos ellos la distancia entre los picos de reflexión, cuando no hay deformación es la misma, ya que solo depende del diámetro de la zona estrechada. A medida que aumenta la longitud aumenta la pendiente y por la tanto la sensibilidad y disminuye el rango dinámico, como se mencionó en el apartado 3.

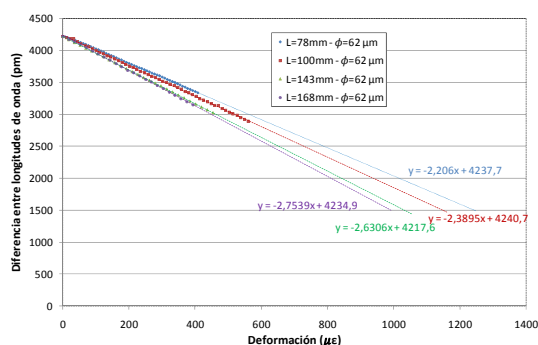


Fig.5: Medidas experimentales de diferentes transductores de igual diámetro y diferente longitud.

5.- Conclusiones

Se ha presentado el estudio teórico y su correspondiente verificación experimental de un transductor de temperatura y deformación formado por dos redes de difracción en fibra óptica y una fibra estrechada. Ambas redes se

han grabado en zonas de la fibra con un diámetro constante, pero diferente para cada una de ellas. Si se aplica una fuerza constante entre los extremos del transductor la deformación en cada una de las zonas del transductor como la deformación total del mismo son diferentes pero proporcionales entre sí. Sin embargo la respuesta a la temperatura de ambas redes es similar, lo que permite hacer la discriminación entre temperatura y deformación. En el diseño del transductor hay dos parámetros (diámetro mínimo y longitud) que determinan que las prestaciones del transductor (rango dinámico y sensibilidad) sean unas u otras. Hay un diámetro que maximiza el rango dinámico y la sensibilidad es mayor cuanto menor sea el diámetro. Si se aumenta la longitud del transductor la sensibilidad aumenta y decrece el rango dinámico. Los resultados teóricos obtenidos han sido verificados experimentalmente caracterizando en deformación y temperatura numerosos transductores con diferentes diámetros mínimos y longitudes.

Agradecimientos: Los trabajos presentados en esta comunicación fueron en parte financiados por el Ministerio Español de Ciencia y Tecnología a través del Proyecto TEC2010-20224-C02-02.

Referencias

- [1] J. M. Lopez-Higuera, [Introduction to optical fiber sensor technology] John Wiley & Sons Inc., New York, 1 (2002).
- [2] M. G. Xu, L. Dong, L. Reekie, J. A. Tucknott, and J. L. Cruz, "Temperature-independent strain sensor using a chirped Bragg grating in a tapered optical fibre," *Electronics Letters*, 31(10), 823-825 (2002).
- [3] O. Frazão, M. Melo, P. V. S. Marques, and J. L. Santos, "Chirped Bragg grating fabricated in fused fibre taper for strain-temperature discrimination," *Measurement Science and Technology*, 16, 984 (2005).

- [4] J. M. Lazaro, A. Quintela, W. Urbanczyk, J. Wojcik, and J. M. Lopez-Higuera, "Bragg Gratings Written in Tapered Solid-Core Photonic Crystal Fibers," *Photonics Technology Letters, IEEE*, 22(14), 1048-1050 (2010).
- [5] O. Frazão, S. F. O. Silva, A. Guerreiro, J. L. Santos, L. A. Ferreira, and F. M. Araújo, "Strain sensitivity control of fiber Bragg grating structures with fused tapers," *Applied Optics*, 46(36), 8578-8582 (2007).
- [6] K. C. Byron, K. Sugden, T. Bricheno, and I. Bennion, "Fabrication of chirped Bragg gratings in photosensitive fiber," *Electronics Letters*, 29(18), 1659-1660 (1993).